

Ti:LiNbO₃ 광도파로를 이용한 전기광학 격자형 변조기 제작

(Fabrication of Electro-Optic Grating Modulator Using Ti:LiNbO₃ Optical Waveguide)

魯大鐵*, 李喆揆*, 尹台焄**, 金在昌**, 韓正熙***, 李用卓***

(Dae Chul Noh, Chul Kyu Lee, Tae Hoon Yoon, Jae Chang Kim, Jung Hee Han, and Yong Tak Lee)

要 約

본 연구에서는 Y-cut LiNbO₃ 기판위에 Ti을 내부 확산시켜 평면도파로를 제작하고, 이 도파로의 도파특성을 밝은 모드선 검사법으로 관측했다. 제작한 Ti:LiNbO₃ 도파로상에 사진식각법으로 interdigital 구조의 Al 전극을 얹어 전기광학 격자형 변조기를 제작하고, 전극에 인가한 전압에 따른 회절 특성을 측정했다.

Abstract

In this study, a planar waveguide has been fabricated on a Y-cut LiNbO₃ substrate by the Ti indiffusion technique and its guiding characteristics are measured by bright M-line spectroscopy. Using the photolithography method, an electro-optic grating modulator with interdigital electrodes has been fabricated by depositing Al on the Ti:LiNbO₃ planar waveguide. And the beam intensity diffracted by the grating is measured as the applied voltage is increased.

I. 서 론

1960년대 레이저가 개발되어 신호의 전송 및 처리에 레이저 광을 이용하고자 하는 연구가 시작되었으며, 1970년대 들어와 광통신이 실용화됨에 따라 이 분

야에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되어 현재 박막(thin film) 제작 기술을 이용한 광집적회로(integrated optical circuits)의 개발에까지 이르렀다!! 더우기 최근에는 컴퓨터의 특수한 계산기능을 광집적회로로 실현하여 계산속도를 현저히 증가시키려는 시도가 활발히 행해지고 있으며, 이러한 광처리 방식을 Numerical Optical Processing(NOP)^[1]이라 부르고 있다.

NOP가 주로 수행하는 기능은 뉘셈, 곱셈, 벡터 곱셈, 벡터-행렬 곱셈 등이며, 이러한 기능은 평면도파로(planar waveguide) 상에 interdigital 구조의 전극을 구성하여, 이 전극에 전압을 인가하여 광의 밝기를 변조함으로써 실현할 수 있다. 변조방법으로는 전기광학(electro-optic), 음향광학(acousto-optic),

*準會員, **正會員, 釜山大學校 電子工學科 (Dept. of Elec. Eng., Pusan Nat'l Univ.)

***正會員, 韓國電子通信研究所 (Electronics and Telecommunications Research Institute)

接受日字: 1989年 7月 18日

(*본 연구는 1987년도 한국과학재단의 일반연구비 지원으로 수행되었음.)

또는 자기광학(magneto-optic) 변조기법이 사용되고 있다. 이들 중 전기광학 변조기법을 이용한 전기광학 격자형 변조기(grating modulator)¹³⁻¹⁴가 진행하는 빔과 회절된 빔 사이의 공간적 분리가 크기 때문에 단일 도파로상에 다양한 논리 기능과 스위칭 기능을 수행할 수 있고, 저전력, 넓은 대역폭, 간단한 제작 및 동작 등의 특성을 갖고 있어 NOP의 기능 실현에 이용되고 있다.

본 논문에서는 광학적계산을 광집적회로로 실현하기 위한 기초단계로서 평면도파로상에 interdigital 구조의 전극을 얹어 전기광학 격자형 변조기를 제작한다. 먼저 평면도파로를 Y-cut LiNbO₃ 단결정 기판 위에 Ti를 내부확산시켜 제작하고, 밝은 모드선 측정방법(bright M-line spectroscopy)으로 제작한 도파로의 유효 굴절율을 측정한다. 다음 제작한 도파로상에 사진식각법(photolithography)으로 interdigital 구조의 전극을 얹어 전기광학 격자형 변조기를 제작하고, 제작한 변조기에 광을 Bragg 각으로 입사시켜 인가한 전압에 따른 회절특성을 측정한다.

II. 전기광학 격자

전기광학 격자는 평면 도파로상에 interdigital 구조의 전극을 얹어 제작할 수 있다. 그리고 격자에 광을 Bragg 각으로 입사시키면 투과빔(transmitted beam)에 대해 입사각의 두 배 되는 각도에서 회절된 빔을 얻을 수 있다. 이 장에서는 전기광학 격자의 구조와 동작원리에 대하여 간단히 살펴보도록 한다.

1. Bragg 효과

평면도파로상에 설계된 interdigital 구조의 전기광학 격자는 그림 1과 같다. 전극에 전압을 인가하면 z 방향의 전계성분에 의한 전기광학 효과 때문에 x 방향으로 진행하는 TE 모드인 이상파(extraordinary wave)에 대한 굴절율이 변화하게 된다. 이러한 굴절율 변화로 인해 도파영역에서 주기적인 격자패턴이 형성되며, 이 격자패턴과 입사빔(incident beam)의 상호작용에 의해서 입사빔은 회절되고, 결국 회절된 빔은 인가한 전압에 따라 세기가 변조된다.

전기광학 격자에 의한 회절은 크게 Raman-Nath 영역과 Bragg 영역으로 나누어진다.¹⁵ 이들의 구분을 나타내는 thickness 파라미터 Q는

$$Q = \frac{2\pi\lambda L}{\Lambda^2} \tag{1}$$

로 주어진다. 여기서 λ는 도파로내에서 진행하는 빔

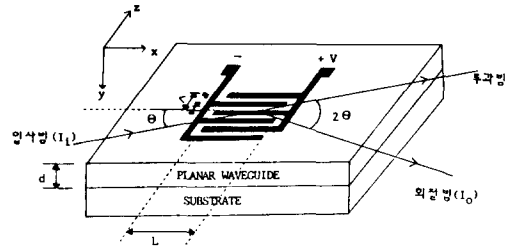


그림 1. 전기광학 격자의 구조
Fig. 1. Structure of the electro-optic grating.

의 파장이며, L은 격자의 길이이고, Λ는 격자의 주기이다. Raman-Nath 영역은 Q < 1인 때로 격자의 주기는 긴 반면 길이가 짧은 경우로써 어떠한 입사각에 대해서도 회절이 일어나며, 또 하나 이상의 회절빔이 존재한다. 그리고 Bragg 영역은 Q > 10인 때로 입사각이 Bragg 조건

$$\sin \theta_b = \lambda / 2\Lambda \tag{2}$$

를 만족시키면 제 1차 회절빔만 강화되고 고차빔은 상쇄되어 투과빔에 대해 2θ_b의 각도에서 하나의 회절빔을 얻을 수 있다. 따라서 Bragg 영역에서 동작하는 격자형 변조기를 제작하기 위해서는 그림1에서

$$L\theta_b \gg \Lambda \tag{3}$$

의 조건이 만족되도록 격자를 설계하여야 한다. 본 실험에서도 이 조건을 만족하도록 격자를 제작하였다.

2. 회절효율

그림 1에서 입사빔 I_i에 대한 회절빔 I_o의 비는 이방성 크리스탈내로 광이 진행할때 생기는 이상파와 정상파 사이의 위상차 Δφ를 알면

$$\frac{I_o}{I_i} = \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} \tag{4}$$

로 주어진다. 그림 1의 구조에서 위상차 Δφ는

$$\Delta\phi = -2\pi L r' n^3 E' / \lambda_0 \tag{5}$$

으로 주어지며, 여기서 r'과 n은 크리스탈의 구조, 전기광학 격자의 위치, 광의 진행 방향에 따라 결정되는 전기광학 상수 및 도파로의 유효굴절율이며, λ₀는 자유공간에서 빔의 파장이고, E'은 인가된 전계를 푸리에 급수로 전개했을 때 기본파에 해당되는 평균전계이다. 식(5)를 식(4)에 대입하면, 회절효율은

$$\frac{I_o}{I_i} = \sin^2 \left(\frac{\pi L}{\lambda_0} r' n^3 E' \right) \tag{6}$$

으로 표시할 수 있다.

식(6)에 의한 회절효율은 크리스탈의 구조, 전기공학 격자의 위치, 그리고 광의 진행방향이 결정되면 계산될 수 있으나, 실제로는 도파로내에서의 정확한 전계분포 상태를 알 수 없기 때문에 일반적으로 실험 데이터를 사용하여 interpolation 시켜주고 있다.

Ⅲ. 평면도파로 제작 및 특성측정

전기광학 격자 제작시 사용되는 평면도파로용 기관 재료로는 우수한 전기광학적 성질과 음향광학적 성질을 갖는 단결정체인 LiNbO₃를 널리 사용한다.

LiNbO₃ 도파로 제작방법에는 Epitaxial Growth, Sputtering, Ion Exchange, Li-out-diffusion, Metal-in-diffusion 등 여러 방법이 있다.^[10] 이들 중 Ti-in-diffusion 방법은 얇은 Ti film을 기관에 증착시킨 후 고온에서 가열하여 확산시키는 것으로, 이상굴절율 및 정상굴절율을 모두 증가시키며, 벌크 결정과 같은 정도의 좋은 전기 광학 특성을 나타내고, 확산 깊이가 작아서 깊이를 쉽게 조절할 수 있으며, 단일 모드 도파로를 제작하기가 용이하다.^[11] 본 실험에서도 Ti-in-diffusion 방법으로 평면도파로를 제작하였다.

Ti을 내부 확산시켜 도파로를 제작할 경우 Li의 외부확산이 동시에 일어나 LiNbO₃ 기관 부근에서 산소와 결합함으로써 Li₂O가 생성된다. 생성된 Li₂O는 기관 표면 부근에서의 굴절율을 증가시켜 결합손실을 크게하며 단일 모드 도파로 제작을 어렵게 한다. 분위기 기체로 수증기가 함유한 아르곤과 산소를 사용하여 확산시키면 Li₂O의 외부확산을 막을 수 있고,^[12] 동시에 광손상도 억제할 수 있다.^[13] 또한 도파로 제작시 확산온도를 증가시키면 전파손실은 줄어들지만, 도파로 표면에서 결정의 극성반전이 형성되므로 전기광학 상수가 감소한다. Juichi Noda^[14] 등에 의하면 확산 온도를 950°C ~ 1050°C 사이의 범위에서 선택하는 것이 좋은 것으로 알려져 있다.

1. 평면도파로 제작과정

본 실험에서는 굴절율 변화량을 비교적 크게 하면서 전기광학 상수를 최대화 하기 위해 광학축 c에 대하여 51°로 자른^[15] Y-cut LiNbO₃ 단결정을 기관으로 사용하였으며, 도파로의 제작과정은 다음과 같다. 먼저 자른 기관위에 전자 빔 증착기를 사용하며 Ti을 약 200Å 정도 증착시킨다. 다음 1000°C 확산로에서 수증기를 함유한 아르곤과 산소를 함께 흘려 주면서 2시간 동안 확산시키고, 분위기 기체를 산소로 바꾼 후 1시간 정도 어닐링하여 도파로를 제작하였다. 끝

으로 제작한 도파로의 광도파 특성을 관측하기 위하여 양 가장자리 부분을 연마하였다. 샌드 paper (1200 Cw)로 1차적으로 갈아낸 다음 실크로 된 연마용 천 위에서 직경 0.3μm와 0.05μm의 알루미늄 가루를 사용하여 연마하고, 가장자리 부분이 깨끗하게 연마되었음을 현미경으로 확인하여 연마작업을 마쳤다.

2. 특성 측정

광도파로의 특성을 측정하는 방법으로는 크게 직접 확산된 도파로내부 구성 성분의 양을 측정하는 직접 측정방법과 프리즘 결합기를 이용하여 측정하는 간접 측정 방법으로 나누어지며, 본 실험에서는 Rutile 프리즘을 이용하여 도파로의 특성을 간접 측정하였다. 제작한 Ti:LiNbO₃ 평면도파로의 특성을 측정하기 위하여 그림 2 와 같은 실험 장치를 구성하였다.

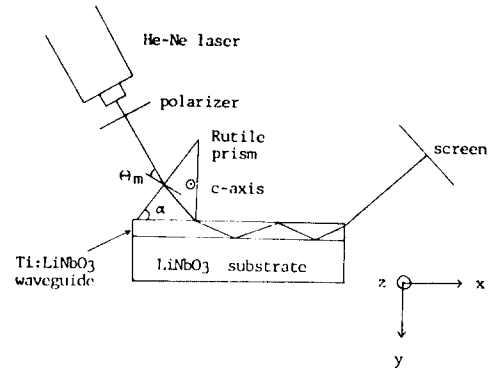


그림 2. 제작한 도파로 측정 장치
Fig. 2. Measurement set-up of the fabricated waveguide.

Polarizer를 이용하여 TE 모드만을 여기서 프리즘으로 입력 결합시킨 뒤 도파되는 빔을 출력측에서 end coupling하여 스크린위에 밝은 모드선이 나타남을 그림 3 과 같이 확인하였다. 광원으로는 파장이 6328Å이고 출력이 5mW인 He-Ne 레이저를 사용하였다.

도파로의 유효굴절율 N_m은 도파모드의 전파상수 β_m을 자유공간에서의 파수(wave number) k₀로 나눈 값으로, 그림 2 와 같이 프리즘 결합기를 이용하여 입사빔이 프리즘 입사면의 법선과 이루는 도파모드의 입사각 θ_m을 측정함으로써 다음 식을 이용하여

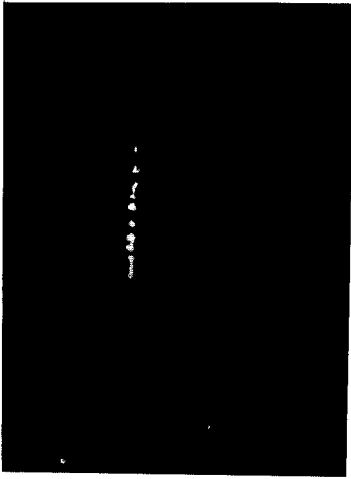


그림 3. 밝은 모드선
Fig. 3. Observed bright M-line.

구할 수 있다.¹⁶⁾

$$N_m = \sin \theta_m \cos \alpha + (N_p^2 - \sin^2 \theta_m)^{1/2} \sin \alpha \quad (7)$$

여기서, α 는 프리즘의 사이각(그림 2 참조)이고, N_p 는 프리즘의 굴절율이다. LiNbO_3 도파로에 TE 모드만을 여기시킨 경우 Rutil 프리즘의 c 축이 그림 2에 표시된 것과 같이 각 α 의 끝과 나란한 방향이므로, Rutil 프리즘내에서 TE 모드는 이상파가 된다. 따라서 Rutil 프리즘의 이상굴절율 값 2.872가 프리즘 굴절율 N_p 로 사용된다. 측정된 입사각으로부터 구한 유효굴절율은 2.209이었다.

IV. 전기광학 격자 제작

광검적회로에 사용될 광소자들의 대부분은 박막에서의 광도파현상을 기초로 하므로 도파방향으로는 수 mm, 그 수직 방향으로는 수 μm 에 이르는 가늘고 긴 미세패턴을 요구한다. 패턴을 제작하는 방법에는 사진식각법(photolithography), E-Beam식각법, X-ray식각법, 이온 빔 에칭(etching), 레이저 식각법 등이 있으며, 본 실험에서는 가장 간단한 공정으로 할 수 있는 사진식각법으로 평면도파로상에 interdigital 구조의 전극을 없어 전기광학 격자를 제작하였다.^{17, 18)} 격자 제작 과정은 다음과 같다.

먼저 식각작업에 사용할 전극 마스크를 제작하였다. 격자형 변조기는 interdigital 전극의 주기가 작

을수록 낮은 인가 전압에서 회절 현상이 일어나며, 투과빔과 회절빔사의 공간적 분리도 커지므로 전극의 주기를 가능한 한 작게 제작하여야 한다. 본 실험에서는 마스크 제작상의 제한과 식각작업의 어려움 등을 고려하여 선폭이 $2.7\mu\text{m}$ 이고, 주기가 $10.8\mu\text{m}$ 인 전극 패턴을 갖는 Cr 마스크를 제작하였다. 또한 전극의 길이는 변조기가 Bragg 형태의 회절을 할 수 있도록 5.8mm로 하였고, finger의 수는 입사빔과 격자 패턴이 충분한 상호작용을 하도록 60개로 하였다.

다음 제작한 평면도파로를 세척하고, 200°C 에서 30분간 건조시켜서 수분을 제거한 후 S 1400-31 positive 포토레지스트를 4500rpm에서 30초간 기판에 스펀 코팅하고, 95°C 에서 30분간 soft-baking을 하여 포토레지스트의 과다한 solvent 성분을 제거한다. Soft-baking에 의해 포토레지스트의 두께는 감소하며, 도파로 표면과의 접착력은 향상되고, 현상에 대한 내성은 증가하게 된다. 다음으로 포토레지스트가 도포된 평면도파로상에 제작한 마스크를 놓고 U.V. 광에 1분 45초-1분 50초 정도 노출시킨 후 lift-off를 용이하게 하기 위해 monochloro benzene에 10분간 담가 포토레지스트 표면을 경화시킨 다음 MF 354 현상액으로 현상을 하였다. 끝으로 현상한 전극패턴에 Al을 약 $700\sim 800\text{\AA}$ 정도 증착하고, 아세톤 용액속에 담가 초음파 진동을 가하면서 전극 이외의 부분의 Al을 제거하여 전기광학 격자를 제작하였다. 평면도파로상에 제작된 전기광학 격자는 그림 4와 같다.

제작한 Al 전극은 실험도중 손상되기 쉬우므로 외부와의 접촉을 피하기 위해서 그림 5와 같이 slide glass로 덮어 보호하였고, 전극에 전압을 인가하기 위해서 금선(gold wire)으로 연결하였다.

V. 전기광학 격자의 실험 및 특성 측정

제작한 전기광학 격자형 변조기의 특성을 측정하기 위해 그림 6과 같은 실험장치를 구성하였다. He-Ne 레이저에서 나온 빔을 polarizer로 TE 모드만을 여기시켜 NA(unmerical aperture)가 0.1인 대물렌즈를 통해 Bragg 각 근처에서 입력측에 end coupling시키고, 출력측에 광검출기(photobdetector)를 두어 전극에 인가한 전압에 따른 회절빔의 intensity profile을 오실로스코프로 관측하였다.

그림 7은 DC 전압을 사용하여 회절빔의 세기를 측정하는 것으로 전압이 높아지면 회절 빔의 세기가 커짐을 알 수 있다. 또 4V 부근에서 half-wave 전압¹⁹⁾이 존재하여 이 이상의 전압에서 회절빔의 세기가 감소할 것으로 예상하였는데 실제로는 거의 포화 상태를 나타내었다. 이러한 현상의 원인은 정확히 알 수

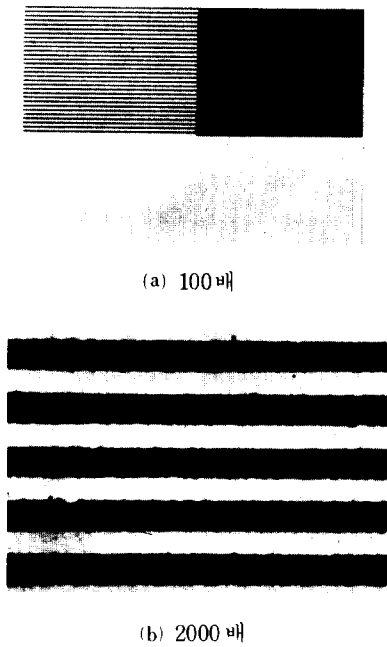


그림 4. 제작한 전기광학 격자
Fig. 4. Fabricated electro-optic grating.

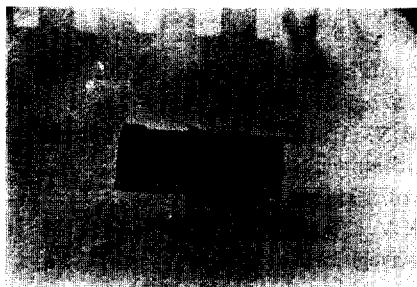


그림 5. Slide glass로 덮어 보호한 샘플
Fig. 5. Sample protected by a slide glass.

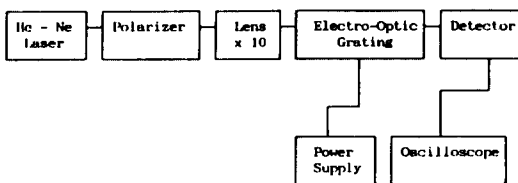


그림 6. 변조기 특성 측정 장치
Fig. 6. Measurement set-up of the modulator characteristic.

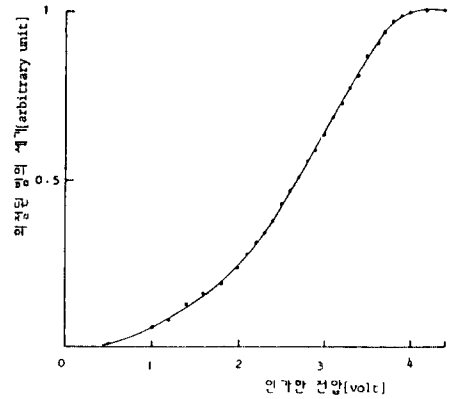


그림 7. 인가한 전압에 따른 회절빔의 세기
Fig. 7. Diffracted beam intensity versus applied dc voltage.

없지만 입사빔의 폭을 최소한 작게하여 입력 결합시켜서 도파로를 통해서만 빔이 진행하도록 함으로써, half-wave 전압 이상에서 회절빔의 세기가 감소하는 특성을 관측할 수 있으리라 생각된다. 또한 측정시에 입사빔을 정확히 전기광학 격자 내로 진행시키는 것이 힘들어 출력쪽에 잡음이 많이 포함되어 있었다. 현재 입력결합방법의 개선을 시도하고 있으며, 이것이 이루어지면 입사빔과 회절빔의 관계를 정확히 정량화할 수 있을 것으로 생각된다.

전극에 peak 치가 1V인 정현파 전압을 인가해 주었을때 회절빔의 세기파형은 그림 8 과 같다. 이때 변조기가 그림 7 에 있는 회절빔의 세기곡선의 선형구간에서 동작하도록 하기 위해 정현파 전압에 2.5V 의 바이어스를 인가하였다. 그림 8 로부터 변조기가 회절빔의 세기곡선의 선형구간에서 동작할 경우 회절빔은 인가한 전압과 같은 주파수를 가지며, 인가한 전압에 따라 세기가 변조됨을 알 수 있었다.

제작한 전극의 용량을 측정하기 위해 56KΩ 의 저항을 전극에 직렬로 연결하고 구형파 전압을 인가하여 전극양단의 RC시정수를 측정하였다. 이 결과로부터 제작한 전극의 용량은 90 pF로 측정되었다. 따라서 50Ω 의 출력저항을 갖는 source 를 사용할 경우 70MHz 의 대역폭을 가질 것으로 생각된다. 또 4V의 전압에 대한 단위 대역폭당 소비전력은 약 0.9mW/MHz 이었다.

1차 회절빔만이 존재하도록 격자에 입사하는 각을 조정하였을 때 출력측에서 30cm 떨어진 지점에서 1차 회절빔과 투과빔은 2cm로 분리되어 관측되었다.

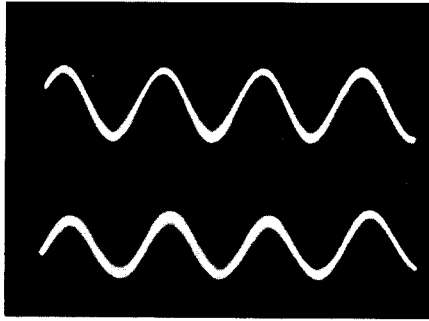


그림 8. 회절빔의 변조 특성
(상) 인가한 전압파형
(하) 회절빔의 세기파형

Fig. 8. Modulation characteristics of the diffracted beam.

이것으로부터 계산한 자유공간에서의 Bragg각은 $\theta_B = 1.9^\circ$ 이었다. 이 값은 식(2)에서 계산한 값을 자유공간으로 변환시킨 값 $\theta_B = 1.7^\circ$ 와 거의 일치하였다. 또한 Bragg 각으로 입사하지 않는 빔에 대해서는 고차 회절빔이 발생함을 알 수 있었다. 입사각이 약 1.4° 인 경우 -1차, 1차 그리고 2차 회절빔을 관측할 수 있었다. 이 때 2차 회절빔은 약 8V의 인가 전압에서부터 관측되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 평면도파로상에 interdigital 구조의 전극을 없어 전기광학 격자형 변조기를 제작하였다.

먼저 평면도파로를 Y-cut LiNbO₃ 기판에 Ti을 내부 확산시켜 제작하였고, 제작한 도파로의 광도파 현상을 밝은 모드선 측정방법으로 관측하였다. 또한 입사빔의 입사각을 측정하여 도파로의 유효 굴절율을 계산하였다.

다음 전기광학 격자형 변조기를 마스크를 이용한 사진식각방법으로 평면도파로상에 interdigital 구조의 전극을 없어서 제작하였다. 제작한 전극의 주기는 $10.8\mu\text{m}$ 로, finger의 갯수는 60개로 하였다. 끝으로 제작한 변조기의 전극에 전압을 인가하여 줌으로써, 전기광학 효과에 의해 회절현상을 관측하였다.

參 考 文 獻

[1] Henry F. Taylor, "Application of guided-wave optics in signal processing and sensing," *Proc. IEEE*, vol. 75, no. 11, p. 1524, 1987.

- [2] C.M. Verber, "Integrated-optical approaches to numerical optical processing," *Proc IEEE*, vol. 72, no. 7, p. 942, 1984.
- [3] J.M. Hammer, D.J. Channin, and M.T. Duffy, "Fast electro-optic waveguide deflector modulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 23, no. 4, p. 176, 1973.
- [4] I.P. Kaminow, J.R. Carruthers, E.H. Turner, and L.W. Stulz, "Thin-film LiNbO₃ electro-optic light modulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 10, p. 540, 1973.
- [5] S. Uehara, Y. Yamauchi, and T. Izawa, "Optical intensity modulator with waveguide structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 24, no. 1, p. 19, 1974.
- [6] Juichi Noda, Naoya Uchida, and Tadashi Saku, "Electro-optic diffraction modulator using out-diffused waveguiding layer in LiNbO₃," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 25, no. 3, p. 131, 1974.
- [7] I.P. Kaminow, V. Ramaswamy, R.V. Schmidt, and E.H. Turner, "Lithium niobate ridge waveguide modulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 24, no. 12, p. 622, 1974.
- [8] John N. Polky and Jay H. Harris, "Interdigital electro-optic thin-film modulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 21, no. 7, p. 307, 1972.
- [9] Ivan P. Kaminow, "Optical waveguide modulators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-23, p. 57, 1975.
- [10] M.N. Armenise, "Fabrication techniques of lithium niobate waveguides," *IEEE Proc.*, vol. 135, no. 2, p. 85, 1988.
- [11] R.V. Schmidt, "Metal-diffused optical waveguides in LiNbO₃," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 25, no. 8, p. 458, 1974.
- [12] J.L. Jackel, V. Ramaswamy, and S.P. Lyman, "Elimination of out-diffused surface guiding in titanium-diffused LiNbO₃," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, no. 7, p. 509, 1981.
- [13] J.L. Jackel, D.H. Olson, and A.M. Glass, "Optical damage resistance of monovalent ion diffused LiNbO₃ and LiTaO₃ waveguides," *J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 7, p. 4855, 1981.
- [14] Juichi Noda, Naoya Uchida, and Mokoto Minakata, "Electrooptic amplitude modulation using three-dimensional LiNbO₃ waveguide fabricated by TiO₂ diffusion," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 27, no. 1, p. 19,

1975.

[15] J.M. Hammer and W. Phillips, "Low-loss single-mode optical waveguides and efficient high-speed modulators of $LiNb_xTa_{1-x}O_3$ on $LiTaO_3$," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 24, no. 11, p. 545, 1974.

[16] R. Ulrich and R. Torge, "Measurement of thin film parameters with a prism coupler," *Appl. Opt.*, vol. 12, no. 12, p. 4855, 1973.

[17] 정석문, Numerical optical processing을 위한 electro-optic grating의 설계 및 제작, 부산대학교 석사학위 논문, 1987.

[18] 노대철, 이철규, 윤태훈, 김재창, 한정희, 이용탁, "Ti:LiNbO₃ 광도파로를 이용한 전기광학 격자형 광변조기의 제작", 1989년도 마이크로파 및 전파전파 광파 및 양자전자공학연구회 합동학술발표회 논문집, vol. 12, no. 1, p. 56.

[19] 노대철, Ti:LiNbO₃ 도파로를 이용한 전기광학 격자형 변조기 제작, 부산대학교 석사학위 논문, 1989.

— 著 者 紹 介 —



魯大鐵(準會員)

1966년 8월 9일생. 1987년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1989년 8월 부산대학교 전자공학과 공학석사학위 취득. 주관심분야는 집적광학, 광 컴퓨터 등임.



尹台燾(正會員)

1956년 8월 24일생. 1979년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1982년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1986년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사학위 취득. 1986년 11월~1989년 3월 부산대학교 전자공학과 전임강사. 1989년 4월~현재 부산대학교 전자공학과 조교수. 주관심분야는 광 컴퓨터, 반도체 레이저, 집적광학, 신경회로망, Optical chaos, Inverse scattering 등임.



金在昌(正會員)

1946년 2월 28일생. 1969년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업. 1974년 2월 부산대학교 대학원 전자공학과 졸업 공학석사 학위 취득. 1979년 8월 미국 알라바마 대학교 대학원 전기공학과 졸업 공학석사 학위 취득. 1981년 8월 미국 알라바마 대학교 대학원 전기공학과 졸업 공학박사 학위 취득. 1975년 3월~1981년 9월 부산대학교 전자공학과 전임강사. 1981년 10월~1985년 9월 부산대학교 전자공학과 조교수. 1985년 10월~현재 부산대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 광 컴퓨터, 광 집적회로, 신경회로망, 반도체소자 등임.



李喆揆(準會員)

1966년 6월 12일생. 1988년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1988년 3월~현재 부산대학교 대학원 전자공학과 재학중. 주관심분야는 직접광학, 광 Computer, 신경회로망 등임.